

태화강 수계의 다변수 어류평가 모델 및 군집분석에 의한 이화학적 수질 특성 및 하천 생태건강도 평가

김 유 표 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학)

Characteristics of Physico-chemical Water Quality Characteristics in Taehwa-River Watershed and Stream Ecosystem Health Assessments by a Multimetric Fish Model and Community Analysis. Kim, Yu-Pyo and Kwang-Guk An* (College of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

This study was to evaluate water quality characteristics and ecological health using a mulimetric fish model in Taehwa-River watershed during May~September 2009. The ecological health assessments were based on the Index of Biological Integrity (IBI) using fish community and the multimetric model of Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI). For the study, the models of IBI and QHEI were modified as 8 and 11 metric attributes, respectively. We also analyzed spatial patterns of chemical water quality over the period of 2000~2009, using the water chemistry dataset, obtained from the Ministry of Environment, Korea. Values of BOD and COD averaged 1.7 mg L^{-1} (scope: $0.1 \sim 31.8 \text{ mg L}^{-1}$) and 3.6 mg L^{-1} (scope: $0.4 \sim 33 \text{ mg L}^{-1}$), respectively during the study. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) averaged 2.8 mg L^{-1} and $96.8 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively, indicating an eutrophic-hypertrophic state. Also, TN and TP showed longitudinal increases toward the downriver reach. In the watershed, QHEI values varied from 67.5 (fair condition) to 164.5 (good condition) by the criteria of US EPA (1993). There was a abruptly decreasing tendency from T9 site in the QHEI values. According to 1st and 2nd surveys of Taewha River, multimetric model values of IBI was averaged 26.1 (n=14) with "good" condition (B) and the spatial variation was evident. Our results suggest that the mainstream sites was getting worse health condition along the river gradient due to inputs of the point and non-point sources from the urban (Ulsan city). Overall, dataset of IBI, QHEI, and water chemistry indicated that the ecological river health showed a downriver decline and the pattern was closely associated with habitat degradations and chemical pollutions as the waters pass through the urban region.

Key words : ecological health, habitat, water quality

서 론

태화강은 울산시 울주군 상북면에 위치한 가지산에서 발원하여 울산시를 관통하여 울산만 해안으로 흐르는 강

으로 울산시의 농업용수와 공업단지의 공업용수를 공급하고 있다(류, 1993). 울산지역이 공업도시로 조성되면서 울산시의 인구는 1980년대의 인구증가율이 연평균 8.0%에 이르는 급격한 증가를 보이고 있으며(울산시, 1990) 공업단지로부터 배출되는 공장폐수와 도시에서 배출되는

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

생활하수로 인하여 울산지역의 수계는 날로 오염도가 증가하고 있는 형편이다(류, 1993). 울산의 급속한 인구증가와 도시화 구역의 확장으로 하류수질은 1991년 BOD 기준으로 11.7 ppm에 이를 정도로 급격히 악화되었다. 이에 1990년대 초반부터 태화강의 수질개선을 위하여 각종 사업이 시행되고 있으며, 주요 수질개선사업은 1995년에 준공된 용연하수처리장 및 차집관로 건설, 2004년에 준공된 언양 수질개선사업소 건설 등이 있다(김, 2009).

태화강 수계의 연구에는 태화강 수질의 미생물학적 연구(이 등, 1991)와 COD와 염소이온 농도를 통한 수질의 특성 연구(류, 1993)가 보고되고 있다. 또한 태화강의 잉어과 어류상에 관한 연구(양, 1980, 1982)를 비롯하여 최근에는 어류를 통한 수질의 내성범위에 관한 연구(서 등, 2008) 등 여러 연구가 보고되고 있다.

서 등(2008)의 보고에 의하면 태화강, 회야강, 동천 및 청량천 중 태화강이 가장 높은 한국고유종의 출현율을 보였으며, 수질과 출현율이 높은 8개 어종을 비교한 결과 참갈겨니, 버들치, 왕종개, 긴물개는 내성에 민감하였으며 참붕어와 붕어는 강한 내성 범위를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 국외에서는 단일변수를 이용한 획일적인 생물평가법을 보완한 다변수 생물평가모델(Multimetric biological assessment model)이 개발되고 있고, 미국 환경부에 의하여 1990년대 초기부터 사용되기 시작하였으며, 현재 미국 41권역에서 수환경 정책 반영에 사용되고 있다(U.S. EPA, 2002). 이·화학적 수질기준과 더불어 어류외의 지표생물인 부착조류 및 저서성 대형 무척추동물을 이용하여 생물학적 하천 건강도 평가를 실시하고 있다(U.S. EPA, 1993; Barbour *et al.*, 1999). 또한 미국 외에도 캐나다, 유럽, 아프리카, 인도, 일본, 호주 등 세계 여러 나라에서 각국의 환경에 맞게 사용되고 있으며(Oberdorff and Hughes, 1992; Harris, 1995; Koizumi and Matsumiya, 1997; Ganasan and Hughes, 1998), 우리나라에서는 다양한 생물분류군을 이용한 모델로서 부착조류(황 등, 2006), 저서성 대형 무척추동물(원 등, 2006), 어류(안 등, 2001a, b) 등이 문헌에 소개되고 있다.

상기 문헌과 같이 태화강 수계에서 수질, 단순 어류상과 군집구조 등과 같은 연구는 활발하게 진행되고 있지만 생물을 이용한 통합적인 건강성 평가가 전무한 실정이다. 최근 생물을 이용한 수환경 평가에 대한 관심이 높아지면서 여러 연구가 시도되고 있으며 환경부 또한 “수생태계 건강성 조사 및 평가”를 2007년부터 4대강을 중심으로 실시하고 있다.

본 연구에서는 이·화학적 수질 및 물리적 서식지 분석을 통하여 어류 분포 특성을 파악하고, 생태 건강성 평가

를 실시하여 태화강 수계의 효율적인 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사시기

본 연구지점인 태화강 수계는 가지산에서 발원하여 울산만으로 흐르는 강으로 유역면적은 643.96 km², 유로 연장은 47 km에 이르는 강으로 지천으로는 곡천, 둔기천, 척과천, 동천 등의 지류를 포함하고 있다. 특히, 곡천 및 둔기천의 지류에는 각각 사연댐과 대암댐이 건설되어 있어 울산 공업단지의 공업용수를 공급하고 있으며 태화강 하류에는 평지의 유역이 발달되어 있어 울산시의 주된 주거지역 및 공업지역으로 활용되고 있다(류, 1993).

태화강의 상·중·하류의 지점별 특성 및 오염원의 영향을 알아보기 위하여 14개의 지점을 선정하였으며, 조사지점은 Horton(1945)과 Strahler(1957)의 하천차(Stream order) 기준에 의거하였으며, 조사지점은 Fig. 1과 같다.

조사시기는 몬순강우의 영향으로 수체가 불안정하면 어류의 교란 요인으로 작용할 수 있어 수체 안정기인 2009년 5월과 9월에 실시하였다.

T1: 울산광역시 울주군 상북면 덕현리 청운교
(N: 35°36'48", E: 129°3'2")

T2: 울산광역시 울주군 상북면 길천리 지현교
(N: 35°34'27", E: 129°6'6")

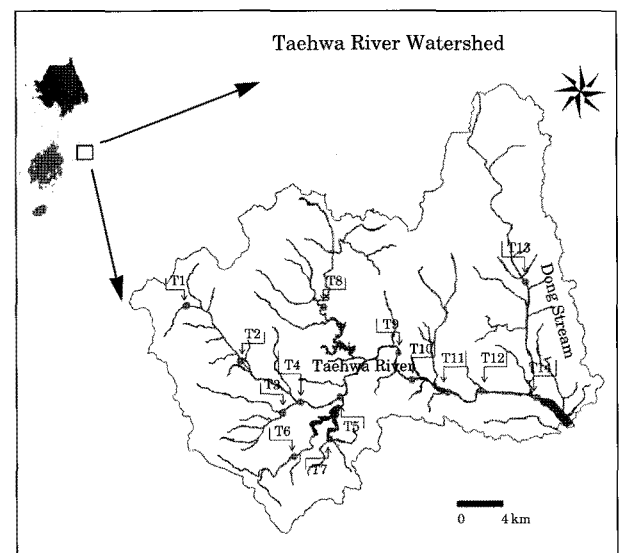


Fig. 1. Sampling sites in Taehwa River.

- T3: 울산광역시 울주군 삼남면 신화리 당사교
(N: 35°32'18", E: 129°8'13")
- T4: 울산광역시 울주군 언양읍 반송리 구수교
(N: 35°32'41", E: 129°9'7")
- T5: 울산광역시 울주군 언양읍 반송리 대암교
(N: 35°32'45", E: 129°11'9")
- T6: 울산광역시 울주군 삼남면 하기리 삼동교
(N: 35°31'15", E: 129°9'47")
- T7: 울산광역시 울주군 삼동면 작동리 작동교
(N: 35°31'6", E: 129°10'37")
- T8: 울산광역시 울주군 언양읍 대곡리 화랑벽화
(N: 35°36'39", E: 129°10'38")
- T9: 울산광역시 울주군 범서읍 구영리 선바위교
(N: 35°34'29", E: 129°14'15")
- T10: 울산광역시 울주군 범서면 구영리 구영교
(N: 35°33'30", E: 129°15'2")
- T11: 울산광역시 남구 삼호동 삼호교 하류
(N: 35°32'56", E: 129°16'58")
- T12: 울산광역시 남구 신정3동 태화교
(N: 35°32'53", E: 129°18'39")
- T13: 울산광역시 북구 농소3동 신담교
(N: 35°37'35", E: 129°20'56")
- T14: 울산광역시 북구 명촌동 명촌대교
(N: 35°32'31", E: 129°21'29")

2. 조사방법

조사는 수생태계의 정량적인 건강성 평가를 위해 개발된 Ohio EPA(1989)의 Wading method를 우리나라 하천 특성에 맞게 수정·보완한 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가(환경부, 2008)의 방법에 의거하였다. 어류 채집은 여울(Riffle), 소(Pool), 유속이 느린 구간(Run)이 존재하는 개방된 곳에서 투망(망목 5×5 mm)과 족대(망목 4×4 mm)를 이용하였다. 채집거리는 각 조사지점에서 상·하류로 200 m 구간에서 50분 동안 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 김 등(2005), 김과 박(2002)에 의거해 동정하였으며 동정 후 바로 놓아주었다. 현장에서의 동정이 어려운 종은 10% 포르말린 용액에 고정하여 실험실로 운반 후 동정하였다.

이·화학적 수질 변수는 생화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand; BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand; COD), 총인(Total phosphorus; TP), 총질소(Total nitrogen; TN), 부유물질(Suspended solid; SS)로서 대화강 수계의 환경부 측정망(<http://water.nier.go>

kr/weis) 지점 자료 중 2000년부터 2009까지 10년간 측정된 자료를 이용하여 조사 지점별 특성을 분석하였다.

물리적 서식지 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 제안되었으며 물리적 서식지 평가 지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHED)는 Barbour *et al.* (1999)에 의해 보정되어 안과 김(2005)에 의하여 국내 하천 특성에 맞게 보완된 11개의 다변수 매트릭 모델을 이용하였다. 각 변수값의 등급구분은 U.S. EPA(1993)의 기준에 의거하여 각 매트릭으로부터 얻어진 값의 합을 최종적으로 최적상태(Excellent, 220~182), 양호상태(Good, 168~124), 보통상태(Fair, 110~66), 불량상태(Poor, 52~8)의 4개 등급으로 구분하여 평가하였다.

어류 군집 구조분석을 위해 아래와 같이 군집 우점도 지수(Simpson, 1949), 종풍부도 지수(Margalef, 1958), 종다양도 지수(Shannon and Weaver, 1963) 및 종균등도 지수(Pielou, 1975)를 산정하였다.

- 1) 군집 우점도 지수(Simpson's Dominance Index, λ)

$$\lambda = \frac{\sum N_i^2 - N}{N(N-1)}$$

[N=총 출현 개체수, N_i =i 종의 개체수, S=총 출현 종수]

- 2) 종 풍부도 지수(Margalef's species richness index, d)

$$d = \frac{(S-1)}{\ln(N)}$$

- 3) 종 다양도 지수(Shannon-Weaver diversity index, H')

$$H' = -\sum P_i \log_{10} P_i$$

$$[P_i = N_i/N]$$

- 4) 종 균등도 지수(Pielou's evenness index, J')

$$J' = \frac{H'}{\log_e S}$$

하천 건강도 평가모델은 북미에서 최초 개발된 어류의 다변수 매트릭인 IBI(Index of Biological Integrity)모델에 기반을 두고(Karr, 1981), Barbour *et al.* (1999)에 의해 재정립된 모델을 국내 하천의 특성에 맞게 수정·보완한 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가(환경부, 2008)의 방법을 기초로 하였으며 총 8개 매트릭 시스템으로 구성되었다. M_1 국내종의 총 종수, M_2 여울성 저서종수, M_3 민감종수, M_4 내성종의 개체수 비율, M_5 잡식종의 개체수 비율, M_6 국내종의 총식종 개체수 비율, M_7 채집된 국내종의 총 개체수, M_8 비정상종의 개체수 비율로 각 매트릭

을 평가하였고, M_1, M_2, M_3, M_7 은 하천차수(Stream order)에 따라 차등 평가하였다. 모델 평가는 환경부에 의해 제시된 바와 같이 각각 “5”, “3”, “1”의 모델값을 부여한 뒤 최종값을 산정하여 최적상태(A: Excellent, 40~36), 양호상태(B: Good, 35~26), 보통상태(C: Fair, 25~16), 불량상태(D: Poor, ≤ 15)의 4개 등급으로 평가하였다. 하천차수별로 Reference 하천에 대한 현장에서의 종수 및 개체수 비율을 산정하여 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 이·화학적 수질 상태

10년간의 자료에 기반을 둔 태화강의 생화학적 산소요구량, 화학적 산소요구량, 총인, 총질소, 부유물질은 지점별로 뚜렷한 변이양상을 보여주었다(Fig. 2).

태화강의 지난 10년간 평균 BOD 값은 1.7 mg L^{-1} 로서

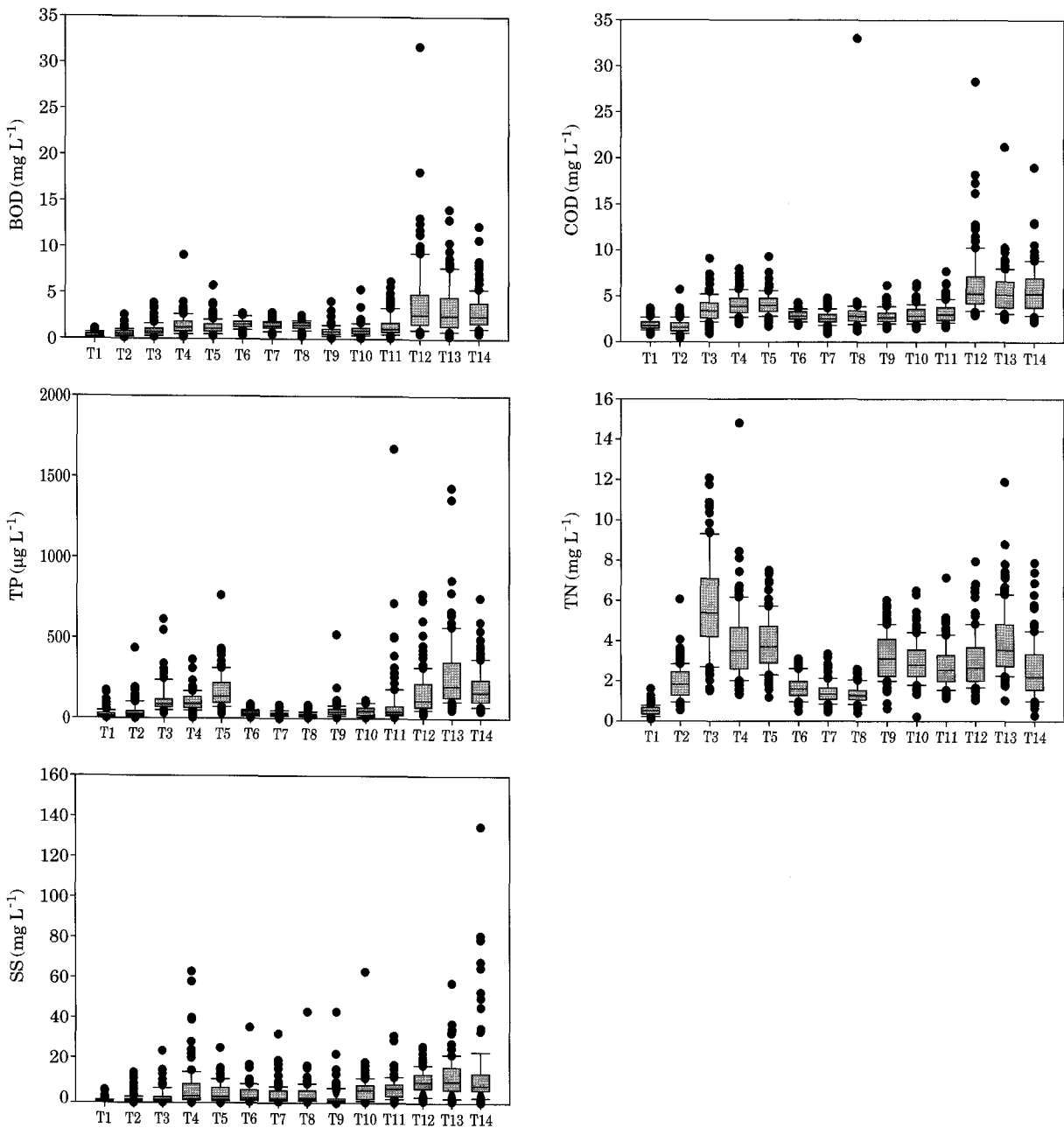


Fig. 2. Change of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and suspended solids (SS) measured from 2000 to 2009 in Taehwa River.

우리나라 수질기준(2010년 1월의 환경부 기준고시)에 의거할 때 Ib(좋음) 등급을 보였고, $0.1 \sim 31.8 \text{ mg L}^{-1}$ 의 넓은 변이폭을 보였다(Fig. 2). 지점별로 상류에서 울산 시내를 관통하면서 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. COD 역시 큰 변이를 보이며($0.4 \sim 33 \text{ mg L}^{-1}$), BOD와 유사하게 울산 시내를 지나면서 증가하는 경향을 보여 하류지점에서 COD가 급격히 증가하는 연구 결과와 일치하였다(류, 1993). BOD와 COD는 상류에서 T5 지점까지 증가한 후 대암호와 사연호의 영향으로 감소하여 울산 시내를 관통하면서 다시 증가한 것으로 사료되었다.

TP의 평균값은 $96.8 \mu\text{g L}^{-1}$ (범위: $0 \sim 1675 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났다며 BOD와 비슷한 양상을 보였다. SS는 5.1 mg L^{-1} (범위: $0 \sim 135 \text{ mg L}^{-1}$)로 T4 지점까지 증가한 후 감소하여 울산 시내에 접어들면서 증가하는 경향을 보였다. TN의 평균값은 2.8 mg L^{-1} (범위: $0.1 \sim 14.8 \text{ mg L}^{-1}$)로 나타났으며, T3 지점의 평균은 5.7 mg L^{-1} 로 가장 높게 나타났다. 이는 하천 옆에 축사가 위치하고 있어 축산폐수가 그대로 방류되어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료되었다(Fig. 2).

2. 물리적 서식지 평가

태화강의 물리적 서식지 평가 지수 값은 T9 지점부터 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). T2 지점은 건천화가 되어 있었으며, 과거 개발로 80% 이상이 인공적으로 만든 제방으로 되어 있어 1, 2차 조사 평균 90으로 "보통상태"(Fair)로 나타났다. T7 지점은 1차 조사에서 건천화가 되어 있었으며, 2차 조사에서는 도로 공사중으로 하천의 흐름이 차단되어 1, 2차 평균 88로 낮게 나타났다. T8 지점은 태화강 수계 중 하천이 인위적으로 변경된 구간이 적었으며, 하천 서식지, 흐름 유형, 수량, 제방식생 등 어류가 서식할 수 있는 최적의 상태로 1, 2차 평균 164.5로 "양호상태"(Good)로 나타났다. T13 지점은 하상이 대부분 썰(Silt)로 이루어져 있으며, 수량이 적고, 제방식생이 거의 없어 1, 2차 조사 평균 67.5로 가장 낮게 나타났다(Fig. 3).

3. 생태 지표종 특성 및 트로픽 길드 분석

어류의 생태지표종 특성 분석은 수질오염 내성도의 정도에 의거하여 분석하였으며 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종(Sensitive species, SS), 내성종(Tolerant species, TS)과 두 범주사이의 중간종(Intermediate species, IS)으로 구분하여 분석하였다.

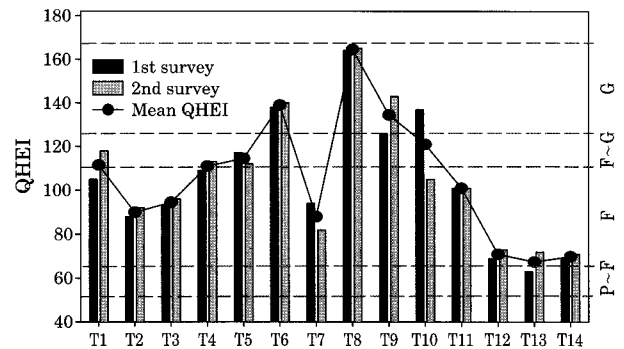


Fig. 3. Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) in Taehwa River. The abbreviations are as follows: Good=G, Fair=F.

태화강의 1, 2차 어류 조사 결과 총 39종 5,058개체가 채집되었으며, 참갈겨니와 민감종이면서 총식종인 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*)가 각각 35.2%, 14.0%로 우점종으로 나타났다(Table 1). 이는 장 등(2001)과 서 등(2008)에 의하여 참갈겨니가 우점한다는 결과와 일치하였다.

태화강의 어류 내성도 길드 분석에 따르면, 민감종은 51.0%(2,581개체), 중간종은 13.4%(677개체), 내성종은 35.6%(1,800개체)로 나타났다(Table 1). 민감종의 69.0%(1,780개체)를 참갈겨니가 차지하여 민감종의 대표어종으로 나타났으며 내성종의 32.1%(578개체)를 피라미가 차지하여 내성종의 대표어종으로 나타났다.

민감종은 본류 구간 중 하류에서 출현하지 않았고, 내성종의 개체수 비율은 울산 시내를 지나는 T10 지점부터 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4). 상류인 T1과 T2에서는 참갈겨니와 버들치의 우점으로 민감종이 우점하였으나 하류로 갈수록 내성종이 우점하는 것으로 나타났다. 특히 T11과 T12 지점은 내성종의 비율이 증가하였는데 이는 태화강 하류에서 급격히 악화되는 수질 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다(류, 1993). T13은 동천 지류로 버들치가 우점하여 민감종의 비율이 높았지만, TN이 3.91 mg L^{-1} , TP는 $273.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 높게 나타나 영양물질 유입에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

어류의 트로픽 길드 분석을 따르면 총식성 어종은 59.2%(2,992개체), 잡식성 어종은 20.5%(1,038개체), 초식성 어종은 12.3%(622개체), 육식성 어종은 8.0%(406개체)로 나타났다(Table 2). 미환경부(U.S. EPA, 1993)에 의하면 하천의 하류로 내려갈수록 잡식종이 증가한다고 보고된 바 있으나 본 조사에서는 이러한 경향은 나타나지 않았다. 총식종 중 참갈겨니의 비율이 59.5%로 높게 나타나

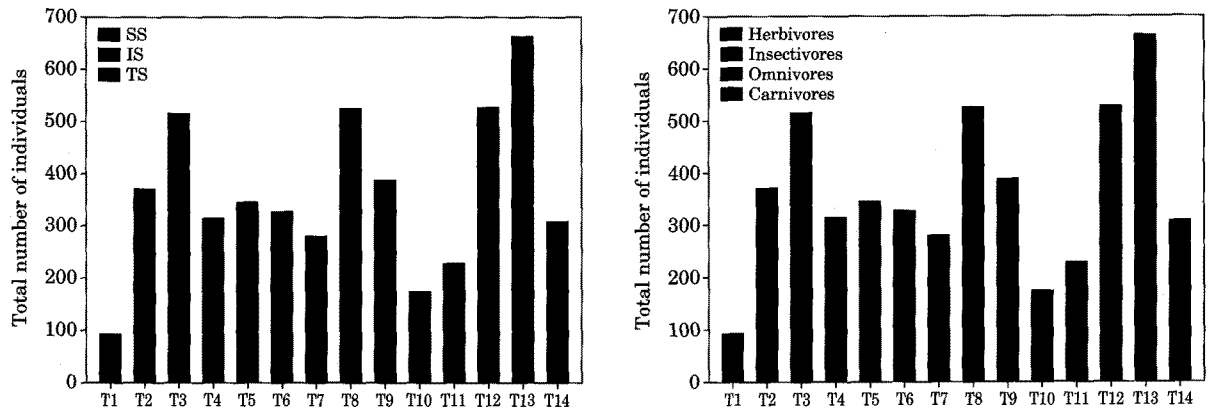


Fig. 4. Tolerance Guild and Trophic Guild in Taehwa River.

태화강 수계에서는 참갈겨니의 비중이 큰 것으로 나타났다. 태화강 수계는 육식종이 8.0%로 분석되었는데, 육식종의 상대빈도가 5% 이상일때 최적상태, 1~5% 일때는 보통상태, 1% 미만일 경우 생태계 악화로 규정된 U.S. EPA (1993)의 기준에 따르면 육식종 비율 측면에서는 최적상태로 평가되었다.

외래어종은 떡붕어, 배스, 블루길 3종이 출현하였으며, T9에서 배스가 36개체 출현하여 종 조성의 교란이 예상되는 지점으로 사료되었고, 비정상개체 (Abnormality, U.S. EPA, 1993)는 T14 지점에서만 출현하였다.

지점별 분석에 따르면, T1은 최상류로 총 3종 93개체가 출현하였고, 계곡천의 특성을 반영하는 것으로 나타났다 (Table 1). T6에서는 태화강 수계 중 유일하게 강준치가 출현하여 대암호의 영향이 있는 것으로 사료되었다. T8은 사연호의 영향을 받는 지점으로 치리가 출현하였으며 참갈겨니가 우점종으로 나타났다. T11에서는 육식성 어종인 끄리가 가장 많이 출현하여 향후 고유종 관리가 필요할 것으로 사료되었다. T12는 기수역으로 전어가 출현하기 시작하였으며 송어가 우점종으로 나타났다. T13은 지류로 버들치가 618개체로 가장 많이 출현하였으며, T14에서는 주둥치가 채집되어 해수의 영향이 뚜렷하게 나타나는 지점이다.

4. 군집 분석

태화강의 어류 군집 특성 분석 결과에 따르면, 1, 2차 조사 결과 최상류 지점인 T1의 종풍부도 지수가 가장 낮게 나타났으며, T2는 참갈겨니의 우점으로 종균등도 지수는 가장 낮게 나타났다. T6과 T8은 다른 지점보다 종풍부도 지수가 높게 나타났는데 이는 대암호와 사연호가 종 조성에 영향을 미치는 것으로 사료되었다. T13은 버들

Table 2. Community analysis, based on the species richness index (d), evenness index (J'), species diversity index (H'), and dominance index (λ) in Taehwa River.

Sampling location	d	J'	H'	λ	
T1	0.4809	0.8253	0.9067	0.4281	
T2	1.752	0.2699	0.6215	0.7693	
T3	1.063	0.2179	0.424	0.8354	
T4	1.47	0.7156	1.488	0.2835	
T5	1.302	0.4972	1.034	0.4318	
T6	2.099	0.7837	1.947	0.1806	
1st survey	T7	0.7972	0.73	1.175	0.3433
	T8	2.21	0.5597	1.436	0.3713
	T9	1.702	0.6084	1.401	0.3655
	T10	1.924	0.8013	1.666	0.2532
	T11	1.287	0.3849	0.7489	0.6665
	T12	0.6646	***	***	0.971
	T13	1.152	0.2412	0.4693	0.8059
	T14	0.6846	0.5694	0.7894	0.4892
2nd survey	T1	0.5939	0.497	0.546	0.6946
	T2	1.32	0.3686	0.7665	0.6467
	T3	1.106	0.441	0.8582	0.5916
	T4	1.704	0.5908	1.36	0.3205
	T5	1.235	0.6797	1.323	0.3171
	T6	1.624	0.6898	1.516	0.2863
	T7	1.44	0.7121	1.481	0.284
	T8	2.108	0.4393	1.127	0.4205
	T9	1.906	0.4301	1.031	0.5513
	T10	2.239	0.6737	1.674	0.3207
	T11	1.249	0.5269	1.025	0.5262
	T12	1.683	0.7556	1.66	0.2619
	T13	1.134	0.138	0.287	0.8954
	T14	0.7367	0.4737	0.7624	0.632

치의 우점으로 종우점도 지수가 0.8954로 높게 나타났다 (Table 2). 태화강 하류 지점인 T12에서는 1차 조사에서

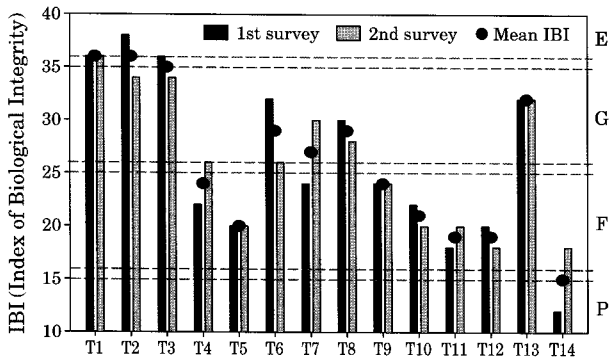


Fig. 5. Index of biological integrity (IBI) in Taehwa River. The abbreviations are as follows: Excellent=E, Good=G, Fair=F, Poor=P.

송어의 우점으로 가장 높은 우점도를 보였지만 장 등 (2001)의 연구에서는 태화강 하류에서 가장 많은 종이 채집되어 종다양도 지수가 가장 높게 나타났다.

5. 생태 건강성 평가

태화강에서 채집된 어류를 이용하여 생물학적 건강도 지수(Index of Biological Integrity, IBI)를 산정하였고, 얻어진 자료는 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가 (2008)의 등급 평가기준에 의거하여 평가하였다.

태화강의 1, 2차 조사 결과 평균 26.1(n=14)로 “양호상태”(B)로 나타났다. 지점별 분석결과 1차 조사에서 상류 지점인 T1, 2, 3은 “최적상태”(A)로 나타났지만, 2차 조사에서는 T2, 3이 “양호상태”(B)로 나타났다. 본류의 중류부는 “보통상태”(C)로 나타났다. 지류인 T6, 8, 13은 “양호상태”(B)로 나타났고, 기수역인 T14는 각각 12, 18로 “불량상태”(D)와 “보통상태”(C)로 나타났다. 특히 T11 지점에서 하류로 갈수록 염도가 5.91‰로 증가하는 양상을 보이는데 이 지점부터 기수역종이 출현하기 시작하여 염도가 종조성에 영향을 주는 것으로 사료되었다. 태화강의 본류 구간의 생물학적 건강도 지수는 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5). 전체적으로 상류에서 하류로 갈수록 서식지 질의 하락 및 오염 물질의 유입으로 건강성 평가의 값이 낮게 나타났다. 또한 수변구역의 식생대의 비율이 하류로 갈수록 감소하고 도시화 비율이 증가하여 식생대의 감소가 어류 군집 교란에 큰 영향을 미친다는 연구 결과와 일치하였다(Allison *et al.*, 2007).

이는 U.S. EPA(1993)에서 보고된 바와 같이 하류로 갈수록 하천차수 및 오염원의 증가로 건강성이 낮아진다는 결과와 일치하였다.

적 요

본 연구는 태화강 수계 14개 지점을 선정하고, 2009년 5월과 9월 2차례 조사를 실시하여 이·화학적 수질, 물리적 서식지 분석을 통하여 어류 분포특성 및 생태 건강도를 진단하였다. 생물통합지수(Index of Biological Integrity, IBI)모델 분석은 국내 하천의 특성에 맞게 수정·보완하여 8개 다변수 메트릭 모델을 이용하였고, 물리적 서식지 평가 지수(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)분석은 11개의 다변수 메트릭 모델을 적용하였다. 이·화학적 수질 분석은 태화강 수계의 환경부 수질 측정망 자료 중 2000년부터 2009년까지 10년간의 자료를 이용하여 분석하였다. 태화강의 지난 10년간 평균 BOD 값은 1.7 mg L⁻¹로서 Ib(중음) 등급을 보였고, 0.1~31.8 mg L⁻¹의 넓은 변이폭을 보였다. COD 값은 3.6 mg L⁻¹로서 역시 큰 변이를 보였고(0.4~33 mg L⁻¹) TN의 평균값은 2.8 mg L⁻¹(범위: 0.1~14.8 mg L⁻¹)로 나타났으며, TP의 평균값은 96.8 µg L⁻¹(범위: 0~1675 µg L⁻¹)로 나타났다. 태화강의 물리적 서식지 평가 지수 값은 67.5로 “보통상태”(C)에서 164.5 “양호상태”(B)의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 본류의 QHEI 값은 T9 지점 이후 하류로 갈수록 울산시의 영향으로 감소하는 것으로 나타났다. 태화강의 1, 2차 조사 결과 평균 26.1(n=14)로 “양호상태”(B)로 나타났다. 태화강 수계의 본류는 울산 시내를 관통하면서 점오염원 및 비점오염원의 영향을 받아 하류로 갈수록 건강성이 악화되는 경향을 보였다. 태화강 수계의 IBI, QHEI, 이·화학적 수질을 살펴보면 서식지질과 수질의 악화로 본류는 하류로 갈수록 건강성이 감소하는 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사.
 김익수, 최 윤, 이충렬, 이용주, 김병직, 김지현. 2005. 원색 한국 어류대도감. 교학사.
 김재홍. 2009. 태화강 수질개선사업의 투자효과 분석. 국토연구 62: 263-279.
 류석환. 1993. 태화강의 수질오염 특성에 관한 연구-화학적 산소요구량과 염소이온 농도-. 한국환경과학회지 2(4): 291-297.
 서진원, 임인수, 김호준, 이혜근. 2008. 울산 하천 및 강에서의 어류서식 현황 및 8개 대표종의 이화학적 수질 내성범위. 한국하천호수학회지 41(3): 283-293.

- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지 **38**(3): 361-371
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계의 평가. 환경생물 **19**: 261-269.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 및 서식지 평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 **34**: 153-165.
- 양홍준. 1980. 태화강의 잉어과 어류상에 관하여. 경북대학교 논문집 **29**: 419-428.
- 양홍준. 1982. 영남지역(낙동강, 형산강, 태화강)의 잉어과 어류에 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문. 부산대학교, 41 pp.
- 울산시. 1990. 울산통계연보. 56 pp.
- 원두희, 전영철, 권순지, 황순진, 안광국, 이재관. 2006. 저서성대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용. 한국물환경학회지 **22**(5): 768-783.
- 이호원, 허성관, 이민웅. 1991. 남강 및 태화강 수질의 미생물학적 연구. 환경연구 **13**: 81-93.
- 장민호, 최기룡, 주기재. 2001. 울산지역(가지산) 상류하천의 어류군집. 한국육수학회지 **34**(3): 239-250.
- 환경부. 2008. 수생태계 건강성 조사 및 평가 최종보고서. 국립환경과학원.
- 황순진, 김난영, 원두희, 안광국, 이재관, 김창수. 2006. 돌말(Epilithic Diatom) 지수를 이용한 국내 주요하천(금강, 영산강, 섬진강)의 생물학적 수질평가. 한국물환경학회지 **22**(5): 784-795.
- Allison, H.R., B.J. Freeman and M.C. Freeman. 2007. Riparian influences on stream fish assemblage structure in urbanizing streams. *Landscape Ecology* **22**: 385-402.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, 2nd Ed, EPA 841-B-99-002. US EPA Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Ganasan, V. and R.M. Hughes. 1998. Application of index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the river Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), India. *Freshwater Biology* **40**(2): 367-383.
- Harris, J.H. 1995. The use of fish in ecological assessment. *Australian Journal of Ecology* **20**: 65-80.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* **56**: 275-370.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Koizumi, N. and Y. Matsumiya. 1997. Assessment of stream fish habitat based on Index of Biotic Integrity. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* **61**: 144-156.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systematics* **3**: 36-71.
- Oberdorff, T. and R.M. Hughes. 1992. Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Serine Basin, France. *Hydrobiologia* **228**: 117-130.
- Ohio EPA. 1989. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol. III, Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macroinvertebrate communities. USA.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. Wiley. New York. 165 pp.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, Gross, S.K. and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrate and fish. EPA/444/4-89-001. Office of water regulations and standards. US EPA. Washington DC, USA.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 688 pp.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions* **38**: 913-920.
- U.S. EPA. 1993. Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters. EPA 600-R-92-111. Environmental Monitoring systems Laboratory-Cincinnati office of Modeling, Monitoring systems, and quality assurance Office of Research Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, USA.
- U.S. EPA. 2002. Summary of biological assessment programs and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: streams and wadable river. EPA-822-R-02-048. U.S. EPA, USA.

(Manuscript received 15 August 2010,
Revision accepted 10 September 2010)